

Гоц Н. Е.,
Петриченко Г. І.,
Кочан Р. В.,
Приймак Ю. М.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛІНІЙНОСТІ ОПТИЧНО-ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТЕРМОМЕТРА ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЕННЯ

В статті запропонована методика забезпечення лінійності функції перетворення оптично-приймальної системи термометра інфрачервоного випромінювання. Вона ґрунтується на визначенні у декількох фіксованих точках температури відхилень від лінійності функції перетворення оптично-приймальної системи термометра випромінювання, формуванні температурної залежності поправок на лінійність та введення їх у вихідний сигнал термометра випромінювання.

Ключові слова: термометр інфрачервоного випромінювання, лінійність функції перетворення, поправка.

1. Вступ

Перспективним шляхом створення еталонного термометра інфрачервоного випромінювання, як еталона-переносника температурної шкали (ТШ) робочим засобом вимірювання температури (термометрам інфрачервоного випромінювання та тепловізорам), є використання існуючої промислової моделі термометра випромінювання (ТМВ) [1]. Існуюча промислова модель ТМВ переобляється для доведення його метрологічних характеристик до необхідних значень. Цей підхід має такі переваги. Немає потреби повної розробки нового ТМВ. Виробник має змогу переробити ТМВ в оптимальний спосіб. Можна обрати таку серійну модель, яка вже має необхідні для подальшої роботи функції.

При застосуванні такого підходу актуальним є забезпечення лінійності оптично-приймальної системи (ОПС) термометра інфрачервоного випромінювання. Розглянемо особливості застосування еталонного ТМВ для передавання температурної шкали ТМВ. Реалізація функції інтерполяції на основі закону Планка на практиці має відбуватися згідно з послідовністю перетворень, наведених на рис. 1.

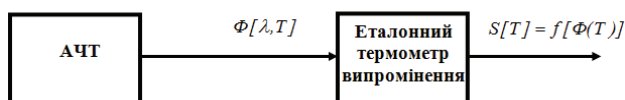


Рис. 1. Загальна схема процесу лінійного перетворення потоку випромінювання $\Phi[\lambda, T]$, пропорційного до температури об'єкта дослідження T , у вихідний сигнал оптично-приймальної системи ТМВ $S[T] = f[\Phi(T)]$

Модель перетворення потоку випромінювання, пропорційного до температури об'єкта дослідження, у вихідний сигнал оптично-приймальної системи (ОПС) термометра інфрачервоного випромінювання описана рівняннями:

$$\Phi[\lambda, T] = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T + B}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda, \quad (1)$$

$$S[T] = f[\Phi(T)] = C \left[\exp\left(\frac{C_2}{AT + B}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (2)$$

Особливої ваги набуває це питання у тепловізорів, що використовують матричні приймачі випромінювання. Для забезпечення експоненціальної залежності вихідного сигналу приймача випромінювання $S[T]$ від температури згідно з законом Планка повинна забезпечуватися висока лінійна функціональна залежність вихідного сигналу приймача $S[T]$ випромінювання (напруги, струму або опору) від потоку випромінювання $\Phi[\lambda, T]$, що надходить на оптичну систему термометра випромінювання. Отже, для формування рівняння інтерполяції на основі закону Планка під час використання еталонного термометра випромінювання актуальним є розроблення методики забезпечення лінійності оптично-приймальної системи ТМВ.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Для забезпечення лінійного характеру функції перетворення ОПС ТМВ повинні виконуватися дві умови суперпозиції [2, 3]:

- умова адитивності $f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$;
- умова однорідності $f(Cx) = Cf(x)$, при $C = \text{const}$.

Відхилення реальної функції перетворення вимірювального перетворювача від номінальної є абсолютною похибкою вимірювального перетворювача:

$$\Delta(x) = f(x, \xi_1, \dots, \xi_m, t) - f_{\text{ном}}(x). \quad (3)$$

В реальності функція перетворення оптично-приймальної системи ТМВ має нелінійний характер, оскільки залежить від наступних факторів. Сприйняття випромінювання приймачем відбувається селективно (вибірково) у певному спектральному інтервалі. У межах цього діапазону приймач має різну чутливість до випромінювання з різними довжинами хвиль, що характеризується спектральною чутливістю $R_{\text{ПВ}i}(\lambda)$ -функцією, що пов'язує спектральну густину енергії випромінювання на цій довжині хвилі та спектральний відгук ПВ (зміна таких фізичних величин, як напруга, струм, опір)

на сприйняте випромінення. Крім того, на чутливість приймача випромінення впливає спектральне пропускання оптичної системи ТМВ $\phi(\lambda)$ -лінз, дзеркал тощо. Також використовують різні види оптичних фільтрів, що характеризуються функціями пропускання $o(\lambda)$, які виділяють випромінення у різних спектральних діапазонах. У результаті спектральна передавальна функція, яка в літературі зустрічається під назвою «апаратна функція», визначається наступними складовими [4, 5]:

$$R_i(\lambda) = R_{ПВ_i}(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot \phi(\lambda). \quad (4)$$

Як зазначено в [6], що нелінійність функції перетворення ТМВ є домінуючою компонентою непевності побудови температурної шкали згідно з МТШ-90 вище від точки срібла і, як наслідок, вимірювання температури за випроміненням в діапазоні температур вище 961,78 °С.

Існуючі конструкторсько-технологічні та схемо-технічні методи лінеаризації функції перетворення [7, 8] унеможливають досягнути необхідного ступеня лінеаризації, оскільки в реальних умовах існує вплив спектральних характеристик оптичної системи на потік випромінення, що надходить на ПВ, та їх залежність від температури. Це визначає необхідність визначення та введення поправок на нелінійність.

Отже, розглянуте дає підстави застосування для еталонного термометра випромінення методу експериментального визначення нелінійності функції перетворення ОПС ТМВ у відповідному температурному діапазоні та подальшого введення поправки на не лінійність функції перетворення. Тобто в еталонному термометрі випромінення має встановлюватися уточнена на основі експериментально визначених поправок функція перетворення ОПС.

Визначення нелінійності оптично-приймальної системи можна проводити методом сумування потоків випромінення від двох джерел методом розробленим в [9], що дає змогу визначати параметр нелінійності η_{A+B} сумування двох вихідних сигналів $S(\Phi_A(\lambda))$ та $S(\Phi_B(\lambda))$ термометра випромінення від дві випромінювання двох джерел А та В. Сьогодні цей метод застосовується для формування лінійності функції перетворення оптично-приймальної системи еталонних ТМВ, що застосовуються для передавання температурної шкали вище 961,78 °С. Але як зазначено в [10], основною його особливістю є те, що він реалізується послідовним сумуванням сигналів за збільшення температури джерела випромінення. Саме це визначає великі фінансові та часові затрати від нагрівання двох АЧТ до потрібної температури та підтримування і стабілізацію їх температури.

Отже, основними вимогами для застосування ТМВ, як еталонного, у методі передавання ТШ на основі закону Планка є: похибка вимірювання температури не повинна перевищувати 0,1 °С; необхідне забезпечення високого ступеня лінійності функції перетворення ОПС ТМВ [11].

Тому метою статті є розроблення методу, який би уможливив забезпечення лінійності ОПС ТМВ та мінімізацію похибки від не лінійності, спричиненої впливом

окремих елементів оптично приймальної системи. Для реалізації поставленої мети доцільно вирішення завдання: визначення температурної залежності поправок на не лінійність ОПС ТМВ. Реалізувати поставлене завдання доцільно шляхом визначення у декількох фіксованих точках температури відхилень від лінійності функції перетворення оптично-приймальної системи термометра випромінення, формуванні температурної залежності поправок на лінійність та введення їх у вихідний сигнал термометра випромінення.

3. Розроблення методики забезпечення лінійності оптично-приймальної системи термометра інфрачервоного випромінення

Для передавання температурної шкали доцільне застосування інтерполяційного рівняння на основі закону Планка. При цьому необхідне визначення температурної залежності довжини хвилі для робочого спектрального та температурного діапазонів ТМВ. Метод передавання температурної шкали на основі закону випромінення Планка можна реалізовувати двома шляхами: прямим передаванням значень реперних температур на основі реперних точок або малогабаритних реперних точок та опосередкованим передаванням шкали з використанням реперних точок, регульованого еталонного випромінювача типу АЧТ та еталонного термометра випромінення. Застосування еталонного термометра при передаванні температурної шкали можливе при забезпеченні високої лінійності функції перетворення ОПС цього ТМВ. При формуванні рівняння інтерполяції на основі закону Планка під час використання еталонного ТМВ необхідне забезпечення лінійності функції перетворення його ОПС. Для забезпечення експоненціальної залежності вихідного сигналу $S[T]$ ОПС еталонного ТМВ від температури T згідно з законом Планка має бути лінійна залежність вихідного сигналу $S[T]$ (напруги, струму або опору) від потоку випромінення $\Phi[\lambda, T]$, що надходить на ОПС систему ТМВ. Структурну схему перетворення сигналу випромінення у нормований електричний сигнал представлена на рис. 2.

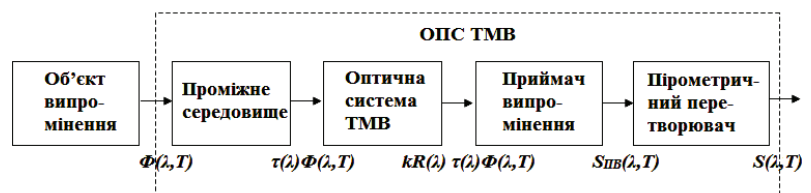


Рис. 2. Загальна схема впливу складових ОПС ТМВ на перетворення сигналу випромінення об'єкта в нормований електричний сигнал

Як зазначалося вище, забезпечити лінійність функції перетворення оптично-приймальної системи еталонного ТМВ апаратними засобами проблематично, оскільки присутні зміни характеристик ОПС ТМВ залежно від спектра випромінення, температури та часу. Тому для забезпечення лінійності доцільним є застосування методу визначення необхідних поправок з подальшим їх введенням до вихідного сигналу ТМВ.

Пропонуємо методику оцінювання нелінійності та забезпечення лінійності оптично-приймальної систе-

ми ТМВ, яка ґрунтується на визначенні у кількох фіксованих температурних точках відхилень від лінійності функції перетворення оптично-приймальної системи ТМВ побудові функціональної температурної залежності поправок на нелінійність та введення їх у вихідний сигнал ТМВ. Послідовність виконання операцій методики показана на рис. 3–5.

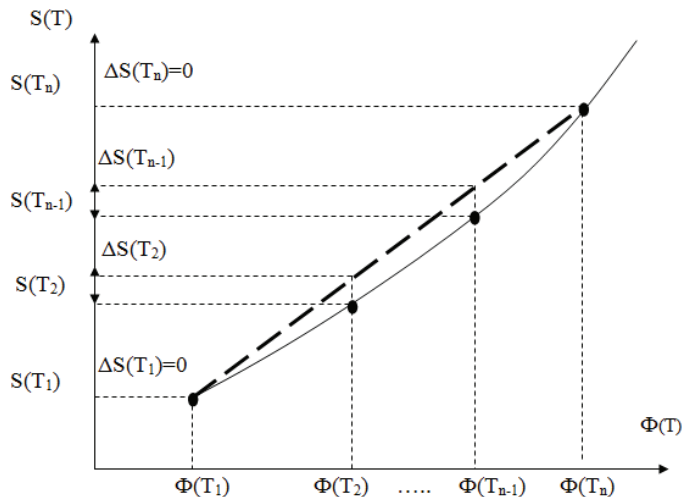


Рис. 3. Відхилення функції перетворення ОПС ТМВ за відомих значень потоку випромінювання температури T_i , що надходить на ТМВ

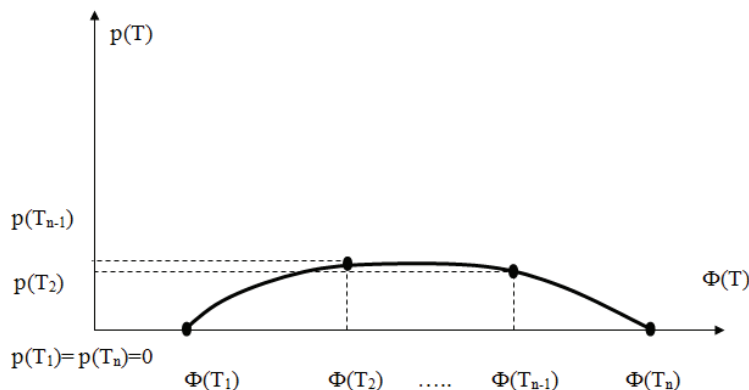


Рис. 4. Функціональна залежність значень поправок для забезпечення лінійності функції перетворення ОПС ТМВ

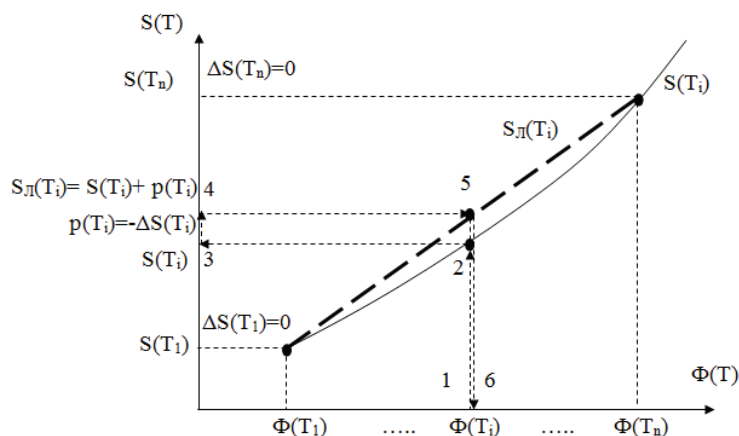


Рис. 5. Послідовність операцій введення поправок для забезпечення лінійності функції перетворення ОПС ТМВ

Потоки випромінювання $\Phi(T_1), \Phi(T_2), \dots, \Phi(T_n)$ відповідають значенням відомих температур T_1, T_2, \dots, T_n . За нелінійного характеру функції перетворення вихідні сигнали ТМВ дорівнюватимуть відповідно:

$$\begin{cases} S(T_1) = k_1 \Phi(T_1), \\ S(T_2) = k_2 \Phi(T_2), \\ \dots \\ S(T_n) = k_n \Phi(T_n), \end{cases} \quad (5)$$

де k_n — коефіцієнт перетворення оптично-приймальної системи ТМВ.

На основі значень вихідних сигналів $S_1(\Phi)$ та $S_n(\Phi)$ від сприйняття потоків випромінювання $\Phi(T_1)$ та $\Phi(T_n)$ методом крайніх точок будується апроксимуюча пряма, яка відповідає лінійній залежності функції перетворення оптично-приймальної системи термометра випромінювання.

Визначаємо значення вихідних сигналів $S(T_2) \dots S(T_{n-1})$ у фіксованих точках температури між точками T_1 та T_n та їх відхилень від лінійної температурної залежності $\Delta S(T_2) \dots \Delta S(T_{n-1})$.

Значення поправок, які необхідно ввести для забезпечення лінійної залежності функції перетворення ОПС ТМВ, визначаються:

$$\begin{cases} p(T_1) = 0, \\ p(T_2) = -\Delta S(T_2), \\ p(T_{n-1}) = -\Delta S(T_{n-1}), \\ p(T_n) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

За значеннями поправок $p(T_1) \dots p(T_n)$ у точках $T_1 \dots T_n$ методом найменших квадратів визначаємо функціональну температурну залежність поправок $p(T) = f(\Delta S(T))$ (рис. 4).

На основі функції поправок $p(T) = f(\Delta S(T))$ для кожної з проміжних точок температурної шкали T_i вводиться поправка для забезпечення лінійності $p(T_i)$ ОПС ТМВ:

$$S_L(T_i) = S(T_i) + p(T_i). \quad (7)$$

Послідовність операцій введення поправок для забезпечення лінійності функції перетворення ОПС ТМВ за умови відомої функціональної залежності поправок вихідного сигналу ОПС ТМВ показана на рис. 5.

Потік випромінювання генерує відповідний вихідний сигнал ТМВ $S(T_i)$ (точки 1–2–3). До значення вихідного сигналу ОПС ТМВ вводиться поправка $p(T_i)$ (точки 3–4). За значеннями $S_L(T_i) = S(T_i) + p(T_i)$ визначається точка 5, що відповідає лінійній залежності функції перетворення ОПС ТМВ та лежить на прямій $S_L(T_i)$. В такий спосіб визначається лінійна залежність функції перетворення ОПС ТМВ, яка необхідна для забезпечення експоненціальної залежності вихідного сигналу $S[T]$ оптично-приймальної

системи (ОПС) еталонного термометра випромінення від температури T згідно з законом Планка [12].

Для реалізації даного методу забезпечення лінійності функції перетворення ОПС ТМВ важливим аспектом є вибір точок температури, в яких перевіряється лінійність, та методики їх відтворення. Фіксовані точки з відомими значеннями температури T_1, T_2, T_n пропонується вибиратися одним з наведених способів залежно від мети перевірки лінійності:

- для забезпечення лінійності функції перетворення ОПС еталонного ТМВ під час його атестації необхідне використання декількох реперних точок температури, які належать температурному діапазону ТМВ. Такими точками можуть бути як основи, так і додаткові РПТ;

- під час контролю лінійності функції перетворення ОПС робочого ТМВ при калібруванні доцільно використовувати фіксовані значення температур, що відтворюються еталонним випромінювачем типу АЧТ;
- для дослідження лінійності функції перетворення ОПС еталонного ТМВ за умови використанні лише однієї фіксованої реперної точки доцільно використовувати послаблення потоку випромінення у кратну кількість разів, наприклад, в 2 рази, що можливо забезпечити, використовуючи двоапертурну діафрагму та одну чи декілька реперних точок.

Для цього запропоновано методи визначення нелінійності ОПС ТМВ, ґрунтуються на виборі точок шляхом двократного послаблення потоку випромінення, що надходить на ОПС ТМВ, для монохроматичного та немонахроматичного сприйняття випромінення, а також при використанні декількох реперних температурних точок.

4. Результати досліджень побудови температурної залежності поправок на нелінійність функції перетворення оптично-приймальної системи термометра інфрачервоного випромінення

Експериментальні дані формування функції поправок для лінеаризації вихідного сигналу термометра випромінення для температурного діапазону $0 \div 419,51$ К та спектрального діапазону $8 \div 14$ мкм наведені в табл. 1.

Приклад побудови температурної залежності поправок для забезпечення лінійності функції перетворення ОПС ТМВ показано на рис. 6.

$$p(T) = f(S(T)), B$$

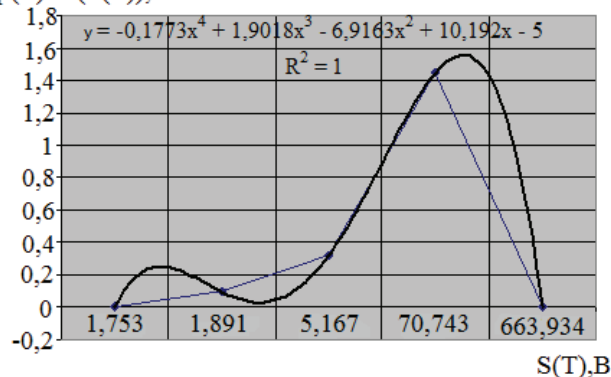


Рис. 6. Температурна залежність поправок вихідного сигналу для забезпечення лінійності функції перетворення ОПС ТМВ у діапазоні температур $692,677 \div 1357,77$ К та спектральній смузі $1 \div 2$ мкм

Згідно з результатами табл. 1 функція поправок має такий вид:

$$p = f(S(T)) = -0,17S_n(T) + 1,90S_n(T)^3 - 6,16S_n(T)^2 + 10,19S_n(T) - 5,00.$$

Лінійні функції перетворення у температурному та спектральному діапазонах згідно з рис. 6 має такий вигляд:

$$S_L(T) = 0,033S(T) + 1,75.$$

На рис. 6 представлено значення поправок, визначених у п'яти фіксованих точках температури згідно табл. 1. За цими значеннями побудована функція поправок — температурна залежність поправок до вихідного сигналу на нелінійність в діапазоні температури $0 \div 419,51$ К.

5. Висновок

Запропонована методика дає змогу оцінити нелінійність наявної функції перетворення термометра інфрачервоного випромінення, ввести поправки на нелінійність та забезпечити лінійності оптично-приймальної системи термометра інфрачервоного випромінення. Для підвищення точності доцільне збільшення кількості точок температури, в яких перевіряється похибка від нелінійності.

Застосування розробленої методики та забезпечення лінійності функції перетворення оптично-приймальної

Таблиця 1

Дані результатів моделювання функції поправок для лінеаризації вихідного сигналу термометра випромінення

Параметр	Значення температур T_i				
№	1	2	3	4	5
Значення температури T_i , К	273,16	302,914	429,748	505,078	692,677
Значення потоку випромінення, $\Phi(T)$, Вт	110,456	180,355	714,362	1195,000	2774,000
Значення вихідного сигналу за лінійної функції перетворення, $S_L(T)$, В	2,802	3,85	11,86	19,075	42,757
Значення вихідного сигналу ПВ, $S_n(T)$, В	2,802	3,911	11,998	19,329	42,757
Відносна похибка від нелінійності ОПС ТМВ, σ	0	0,016	0,012	0,013	0
Значення поправки для забезпечення лінійності функції перетворення ОПС ТМВ, $p(T)$, В	0	0,061	0,138	0,254	0

системи еталонного термометра випромінення дає змогу реалізувати передавання температурної шкали термометрам інфрачервоного випромінення та тепловізорам на основі закону випромінення Планка в діапазоні температур від -50 до 1500 °C.

Запропонована методика доцільна для застосування при перевірці лінійності еталонного термометра випромінення, з використанням якого температурна шкала передається робочим термометрам інфрачервоного випромінення.

Методику може бути використана при розробленні нормативного документу — методики атестації еталонних термометрів випромінення.

Література

1. Battuello, M. The European Project TRIRAT: Arrangements for and Results of the Comparison of Local Temperature Scales with Transfer Infrared Thermometers between 150 °C and 962 °C [Text] / M. Battuello, F. Girard, T. Ricolfi et al // Academic Journal AIP Conference Proceedings. — 2003. — V. 684, Is. 1. — P. 903.
2. Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники [Текст] / П. П. Орнатский. — Киев: Вища школа, 1976. — 432 с.
3. Данилов, А. А. Методы и средства оценивания нелинейности функции преобразования измерительных преобразователей [Текст] / А. А. Данилов. — Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2001. — 138 с.
4. Rogalski, A. History of infrared detectors [Text] / A. Rogalski // Opto-Electronics Review. — 2012. — Vol. 20, № 3. — P. 279–308. doi:10.2478/s11772-012-0037-7.
5. Гриневич, Б. Ю. Візуальний пірометр з розширеною нижньою границею вимірювання [Текст] / Б. Ю. Гриневич, Т. П. Дармограй, Н. Є. Гоц // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання, керування. — 2004. — № 500. — С. 165–170.
6. Saunders, P. Propagation of Uncertainty Due to Non-linearity in Radiation Thermometers [Text] / P. Saunders, D. R. White // International Journal of Thermophysics. — 2007. — Vol. 28, № 6. — P. 2098–2110. doi:10.1007/s10765-007-0244-5.
7. Гаврилюк, М. А. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин [Текст] / М. А. Гаврилюк, Е. С. Полищук, С. С. Обозовский и др. — Киев: Вища школа, 1984. — 360 с.
8. Theocharous, E. Absolute Linearity Measurements on HgCdTe Detectors in the Infrared Region [Text] / E. Theocharous, J. Ishii, N. P. Fox // Applied Optics. — 2004. — Vol. 43, № 21. — P. 4182–4188. doi:10.1364/ao.43.004182.
9. Mielenz, K. D. Spectrophotometer Linearity Testing Using the Double-Aperture Method [Text] / K. D. Mielenz, K. L. Eckerle // Applied Optics. — 1972. — Vol. 11, № 10. — P. 2294–2303. doi:10.1364/ao.11.002294.
10. Назаренко, А. Л. Построение радиационной температурной шкалы в инфракрасной области спектра [Текст] / А. Л. Назаренко // Украинский метрологический журнал. — 2002. — № 4. — С. 31–34.
11. CCT-WG5 on Radiation Thermometry. Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point [Electronic resource] / J. Fischer, P. Saunders, M. Sadli et al. — April 2008. — Version 1.71, Final Version. — 41 p. — Available at: \www/URL: http://www.bipm.org/wg/CCT/CCT-WG5/Allowed/Miscellaneous/Low_T_Uncertainty_Paper_Version_1.71.pdf. — 19.07.2014.
12. Назаренко, Л. А. Реалізація температурної шкали нижче від точки тверднення срібла $961,78$ °C на реперних точках МТШ-90 [Текст] / Л. А. Назаренко, Н. Є. Гоц // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2010. — № 71. — С. 77–82.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ОПТИКО-ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОМЕТРА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В статье предложена методика обеспечения линейности функции преобразования оптико-приемной системы термометра инфракрасного излучения. Она основывается на определении в нескольких фиксированных точках температуры отклонений от линейности функции преобразования оптико-приемной системы термометра излучения, формировании температурной зависимости поправок на линейность и введения их в выходной сигнал термометра излучения.

Ключевые слова: термометр инфракрасного излучения, линейность функции преобразования, поправка.

Гоц Наталія Євгенівна, доктор технічних наук, доцент, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: natalia.gots@lp.edu.ua.

Петриченко Геннадій Іванович, директор, ТОВ «Харків-Прилад», Україна, e-mail: gena@pribory.com.

Кочан Роман Володимирович, доктор технічних наук, доцент, кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: kochan.roman@gmail.com.

Приймак Юлія Миколаївна, аспірант, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: gupostalgu@inbox.ru.

Гоц Наталия Евгениевна, доктор технических наук, доцент, кафедра метрологии, стандартизации и сертификации, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Петриченко Геннадий Иванович, директор, ООО «Харьков-Прибор», Украина.

Кочан Роман Владимирович, доктор технических наук, доцент, кафедра специализированных компьютерных систем, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Приймак Юлия Николаевна, аспирант, кафедра метрологии, стандартизации и сертификации, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Hots Nataliya, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: natalia.gots@lp.edu.ua.

Petrychenko Hennadyy, LLC «Kharkiv-Device», Ukraine, e-mail: gena@pribory.com.

Kochan Roman, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: kochan.roman@gmail.com.

Pryymak Yuliya, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: gupostalgu@inbox.ru.